

С.Н. Лавриненко, канд. техн. наук, Харьков, Украина;
 А.Г. Мамалис, д-р техн. наук, Афины, Греция;
 М.С. Дунайчук, канд. физ.-мат наук, Днепропетровск, Украина

УПРАВЛЕНИЕ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И КОМПЕНСАЦИЯ ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Аспекти практичної реалізації адаптивного контролю точності руху робочих органів прецизійних технологічних систем за допомогою актуаторів представлені у даній статті. Особлива увага приділяється розгляду питання виготовлення ультрапрецизійних офтальмологічних асферичних лінз з полімерних матеріалів.

The aspects of practical realization of adaptive control of precision technological systems working bodies by means of actuators are presented in this article. In particular the question of manufacture of ultraprecision ophthalmologic aspherical lenses from polymeric materials is considered.

Используя теоретические предпосылки организации систем адаптивного контроля в качестве контролируемых и управляемых воздействий на рабочие органы прецизионных технологических систем можно использовать контроль возбуждающего воздействия силы резания или контроль возбуждения системы под действием импульса. В особых случаях ультрапрецизионного резания необходимо применять комплексный контроль движения рабочих органов, то есть контролировать одновременно возбуждающее действие силы резания, импульса и совместное возбуждающее воздействие силы и импульса, т.е. смешанный контроль [1-5].

Так как прецизионная и ультрапрецизионная лезвийная механическая обработка осуществляется, главным образом, с высокими скоростями резания, то для определения критерия оптимизации возникает необходимость решать задачу высокоскоростного контроля функций позиционирования рабочих органов в направлении главного движения резания и тогда уточненным критерием оптимизации (K_e) будет максимизация средней скорости движения абсолютно твердого тела - режущего элемента в виде резца или режущей вставки, эквивалентная скорости резания (v):

$$K_e = v_{\max} \quad (1)$$

В качестве граничных условий выбираются следующие:

- |a| - ускорение во время рабочего хода;
- |R| - максимальное значение силы резания;
- |x| - горизонтальное смещение во время движения (ошибка позиционирования).

Решая задачу создания адаптивной динамической системы управления, мы получили идеальную траекторию контроля в фазовой плоскости для данного промежутка времени [6] и в условиях реального процесса прецизионной механической обработки необходимо стремиться к максимальному приближению к этой модели.

Из всех допустимых контрольных акций (для контроля силы резания $U \in U_0$ или импульса $S \in S_0$) определяем управляющее воздействие, которое переводит нашу базовую систему из начальной позиции x_0 в выбранную конечную позицию x_1 :

$$\dot{x} = f(t, x, u) + \frac{S_1}{m} \delta(t - t_1) \quad (2)$$

а также гарантировать максимальное или минимальное значение оптимизационного критерия:

$$K_e = \int_{t_0}^{t_1} f_0(t, x, u, S, t_p) dt \quad (3)$$

если существуют дополнительные ограничения по фазовым координатам и управляющим импульсам:

$$|\dot{x}| \leq v_0; |x| \leq \delta; m \leq m_0; \tau \geq \tau_0 \quad (4)$$

где: v_0 - ограничение скорости резания;

δ_0 - ограничение точности позиционирования рабочего органа;

m_0 - максимальное число управляющих импульсов;

τ_0 - минимальный интервал времени между управляющими импульсами.

Определяем управляющее воздействие по изменению состояния системы с одной степенью свободы:

$$m\ddot{x} = -cx + R(t) \quad (5)$$

Из начальной позиции $x_0(-A; 0)$ в конечную позицию $x_1(0; +A)$ за минимальное время $t_{\min} = T = K$, если контролируемая сила $R(t)$, эквивалентная силе резания имеет предел:

$$|R(t)| \leq R_0 \quad (6)$$

Так как мы имеем случай перемещения с высокой скоростью, то:

$$K = \int_{t_0}^{t_1} l \cdot dt \quad (7)$$

Приняв $t_0 = 0$, а $t_1 = t_{\min} = T$, мы будем иметь выполнение равенства $K = T$.

Преобразуя уравнение системы (6.6) при $x_I = x$; $\dot{x}_1 = \dot{x}_1$ или $\dot{x}_1 = \dot{x}_1$; $\dot{x}_2 = -\frac{c}{m} \dot{x}_1 + u(\dot{x})$, мы имеем функцию Гамильтона:

$$H = \psi_1 + \psi_1 \dot{x}_1 + \psi_2 \left(-\frac{c}{m} \dot{x}_1 + u(\dot{x}) \right) \quad (8)$$

или $H = \psi \cdot X$, (9)

где: $\psi = \begin{Bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{Bmatrix}$; $X = \begin{Bmatrix} 0 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix}$.

При этом скалярное произведение векторных функций ψ и X в любой момент времени для максимизации функции H должно быть максимальным. Для достижения этого управляющее воздействие $u(t)$ должно быть ограничено пределами $u(t) = \pm u_0$, зависящими только от функции ψ_2 , то есть $H = \max H$,

если $\psi_2 \left(-\frac{c}{m} \dot{x}_1 + u(\dot{x}) \right) = \max$

Вследствие этого, если $\psi_2 > 0$, то $u(t) = \pm u_0$ и, если $\psi_2 < 0$, тогда $u(t) = -u_0$. Графически это представлено на рис. 1.

Так как контролируемое движение рабочего органа механической системы достаточно мало, то управляющее воздействие может иметь один момент переключения и графически представляться следующим образом (см. рис. 2).

В качестве примера реализации на практике этих результатов можно привести разработанную с участием автора высокоскоростную импульсную систему корреляции ошибок, возникающих в процессе резания, с использованием пьезоэлектрического привода Burleigh PZL-015.

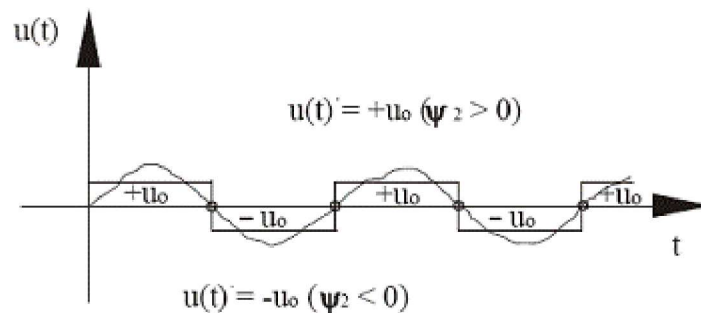


Рис. 1. Оптимизированное управление с моментами переключения от $+u_0$ до $-u_0$

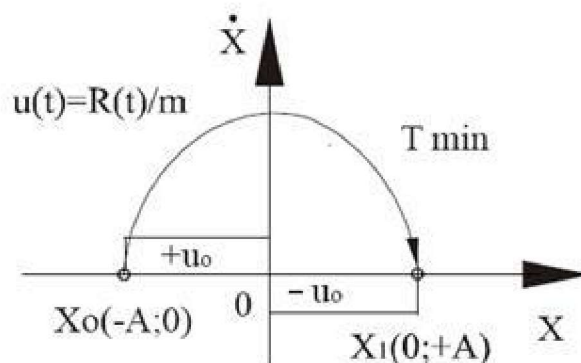


Рис. 2. Управление движением рабочего органа прецизионной механической системы с одним моментом переключения.

Структурная схема реализации технологической системы для ультрапрецизионного алмазного точения офтальмологических астигматических полимерных линз представлена на рис. 3. Станок имеет виброизолированную станину в виде массивного гранитного основания. На станине на салазках продольного перемещения крепится высокоскоростной шпиндельный узел, оснащенный воздушными подшипниками. На салазках поперечного перемещения крепится резцедержка, оснащенная актуатором.

Формируемая на токарном станке поверхность линзы - это часть поверхности тороида. Если мы принимаем, что постоянная скорость резания v_c не зависит от радиуса, то амплитуда ускорения вершины инструмента также будет независимой от радиуса:

$$\left| \ddot{x} \right| = 4u \left(\frac{v_c}{r_u} \right)^2 \quad (10)$$

Например, для скорости $v_c = 10$ м/с при $r_u = 40$ мм и $u = 5$ мм ускорение вершины режущего клина составит 1250

м/с².

На рис. 4 представлена принципиальная схема мехатроники высокоскоростной станочной системы корреляции при помощи актуатора. Закрепленный на продольных салазках шпиндельный узел с хорошо сдмпфированной собственной резонансной частотой воздушных подшипников 400 Гц контролируется пропорционально-дифференциальным контроллером с частотой пропускания 30 Гц. Линейное положение на оси продольной подачи контролируется сенсором, являющимся частью интерферометра белого света, с резонансной частотой 150 Гц. Принимаем в данной модели, что ответная реакция воздействия актуатора на инструмент направлена через жесткие салазки поперечного перемещения непосредственно на станину станка.

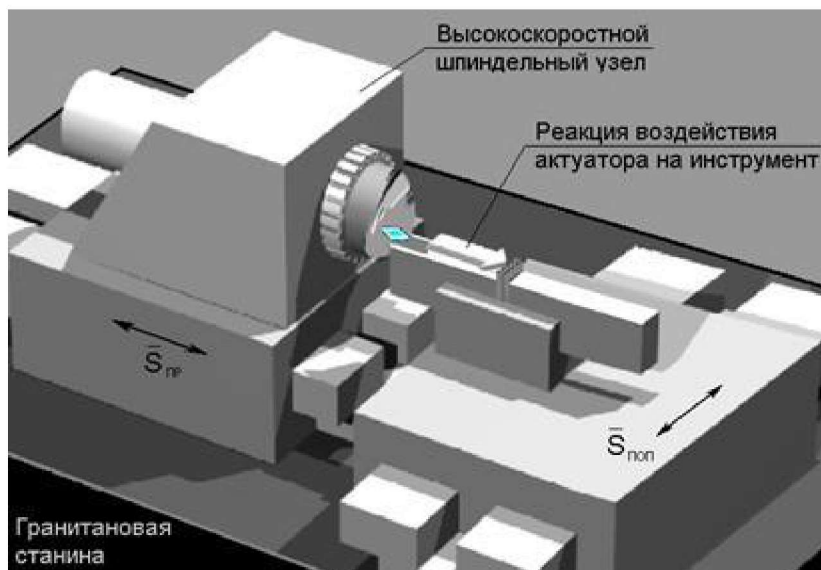


Рис. 3. Структурная схема реализации высокоскоростной системы корреляции ошибок при ультрапрецизионном алмазном точении асферических линз

Масса гранитовой станины $m_c = 500$ кг, масса продольной направляющей $m_n = 75$ кг, масса шпиндельного узла $m_{ш} = 16$ кг и масса актуатора $m_a = 0,05$ кг. Реакция воздействия актуатора направлена либо непосредственно на станину станка (F_1) либо на реактивную массу в желобе салазок поперечного перемещения $m_p = 2$ кг (F_2).

На рис. 5 представлены графики передаточных функций для двух случаев: кривая 1 - при прямом воздействии актуатора и кривая 2 - при воздействии на реактивную массу.

На графике ярко выражен пик резонанса в интервале частот 150 - 170 Гц, что объясняется резонансом системы измерения механизма продольного перемещения. Этот резонанс незначительный, но следует обращать особое внимание на жесткость системы исполнительных механизмов, особенно учитывая величину ускорения актуатора.

Пропорционально-дифференциальное регулирование амплитудно-частотной характеристики колебаний системы станок-приспособление-инструмент-заготовка при помощи воздействия актуатора на реактивную массу позволяет сглаживать импульсы, возникающие в результате ошибок управляющих воздействий на рабочие органы станка. Особенно заметно улучшение амплитудных характеристик при формировании эквидистанты профиля линзы вблизи ее оси, где окружная скорость главного движения резания стремится к нулю (см. рис. 6).

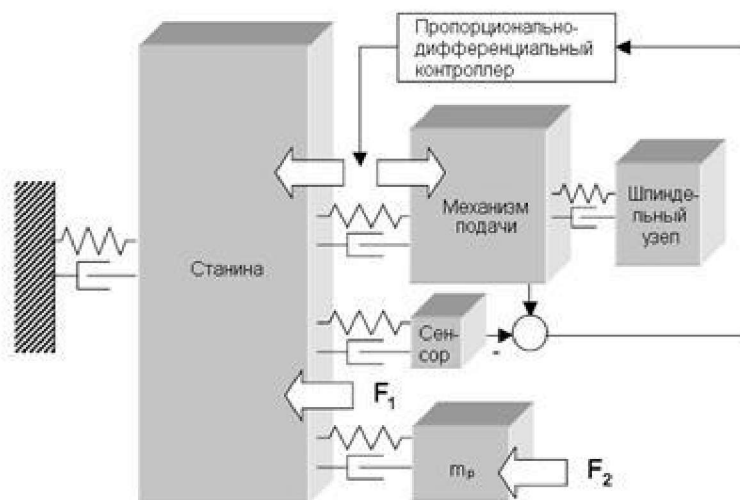


Рис. 4. Принципиальная схема мехатроники высокоскоростной системы корреляции ошибок

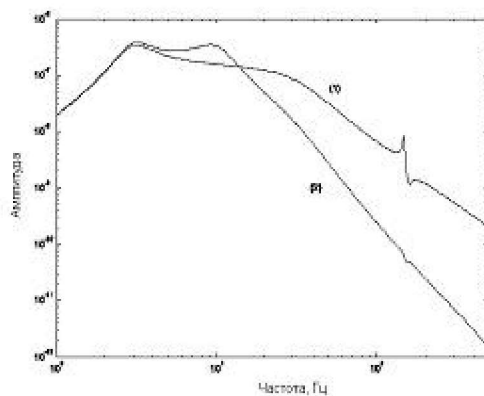


Рис. 5. Графики передаточных функций: (1)- при прямом воздействии актуатора;
(2) - при воздействии на реактивную массу

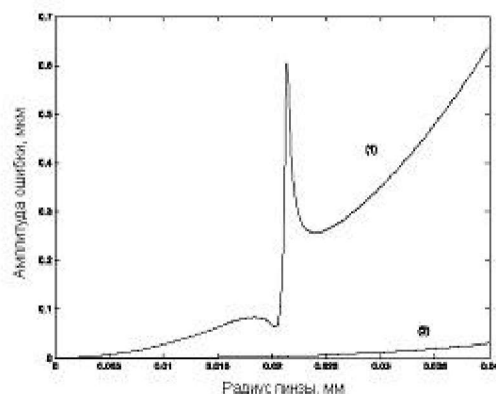


Рис. 6. Амплитудные характеристики формирования профиля линзы:
(1) - Обработка без управляющего воздействия на рабочий орган станка
(2) - Обработка с управляющим воздействием на рабочий орган станка

Список литературы: 1. Кумабэ Д. Вибрационное резание. / Пер. с яп. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с. 2. Проблемы идентификации нестационарных объектов в измерительной технике. - Новосибирск: Изд-во Сибирского науч.-исслед. ин-та метрологии, 1971. - 212 с. 3. Райбман Н.С., Чадаев В.М. Адаптивные модели в системах управления. - М.: Советское радио, 1966. - 159 с. 4. *Advances in Optimization and Control.* / Eiscit B. A. and Pederoli G./ - Berlin: Springer-Verlag, 1988. - P. 37- 42. 5. Viba J. Adaptive Control. // North Atlantic Treaty Organization - ASI "Responsive Systems for Active Vibration Control" - Brussels, 2001 - 10 p. 6. Лавриненко С.Н. Оптимизация процессов управления движением рабочих элементов прецизионных нелинейных механических систем // Вестник НТУ "ХПИ": 36. научн. трудов. Вып. 11, 2002, С. 11-18.

Поступила в редколлегию 25.05.09